

М.И., Колзушко Г.М., Лысенко В.О. и др. Экспериментальная оценка электрического сопротивления и электропроводности сильнооточного плазменного канала в цепи разряда мощного генератора тока искусственной молнии // Электротехника і електромеханіка. – 2011. – № 1. – С. 61-64. 11. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с. 12. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ», 2009. – 384 с. 13. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – Киев: Наукова думка, 1990. – 208 с.

Поступила в редколлегию 21.03.2011

УДК 621.3:537.3

М. И. БАРАНОВ, д-р техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
В. М. ЗИНЬКОВСКИЙ, зав. сектором, НТУ «ХПИ»;
Н. Н. ИГНАТЕНКО, канд. техн. наук, зав. сектором, НТУ «ХПИ»

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЦЕПЕЙ ПОДЖИГА В МОЩНЫХ ГЕНЕРАТОРАХ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ МОЛНИИ С КРОУБАР-ЗАМЫКАТЕЛЯМИ НАГРУЗКИ

Запропонована методика вибору в генераторах великих імпульсних струмів блискавки (ГВІСБ) електричних параметрів $L_n C_n$ – кіл керування. Показано, що за допомогою $L_n C_n$ – кіл керування спрацювання керованих повітряних стержневих розрядників кроубар-замикачів навантаження в генераторах ГВІСБ відбувається в момент досягнення струмом у RL – навантаженні свого максимального значення.

Procedure for choice of electric parameters of $L_n C_n$ – control circuits in generators of high pulsed currents of lightning (GHPCL) is proposed. It was shown that, with help of $L_n C_n$ – control circuits, operation of controlled air rod dischargers of crowbar-closers load in GHPCL generator occurs in the moment when current in RL – load reaches his maximal value.

Введение. Повышение стабильности работы генераторов больших импульсных токов молнии (ГБИТМ) при рабочих напряжениях порядка 1 МВ является важной и актуальной научно-технической задачей. В последние годы в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» был разработан мощный генератор ГБИТМ, работающий при рабочих напряжениях емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) до 1,7 МВ [1,2]. Схема замещения такого генератора ГБИТМ с применением управляемых воздушных стержневых разрядников атмосферного давления замыкателей RL – нагрузки показана на рис. 1. В указанном генераторе импульсных токов напряжение поджига управляемых воздушных стержневых разрядников P_2 и P_3 замыкателей RL – нагрузки формируют $L_n C_n$ – цепи, подключенные к части конденсаторов, последовательное соединение которых образует корректирующие емкости $C_{к1} = C_{к2}$ [2]. Работает данный ГБИТМ следующим образом: после срабатывания разрядника P_1 ЕНЭ генератора разряжается на электрические цепи замыкателей и RL – нагрузку. Импульсное напряжение,

снимаемое с части последовательно соединенных высоковольтных конденсаторов $C_{1к} = C_{2к} = \dots = C_{12к}$ и $C_{13к} = C_{14к} = \dots = C_{24к}$, образующих в рассматриваемом ГБИТМ корректирующие емкости $C_{к1} = C_{к2}$, дифференцируется двумя высоковольтными $L_n C_n$ -цепями, имеющими емкости $C_{n1} = C_{n2}$ и индуктивности $L_{n1} = L_{n2}$. Импульсное напряжение поджига $u_{n1}(t) = u_{n2}(t)$, формируемое индуктивностями $L_{n1} = L_{n2}$, через разделительные емкости $C_{p1} = C_{p2}$ подается на поджигающие электроды управляемых воздушных стержневых разрядников P_2 и P_3 замыкателей RL -нагрузки. Электрический пробой воздушных промежутков поджига, имеющих длину $S_{n1} = S_{n2}$, является инициирующим фактором, способствующим срабатыванию управляемых воздушных стержневых разрядников кроубар-замыкателей RL -нагрузки в ГБИТМ (рис. 1). Рациональный выбор электрических параметров $L_n C_n$ -цепей поджига позволяет скорректировать момент времени, при котором происходит пробой воздушных поджигающих промежутков и основных промежутков разрядников P_2 и P_3 . Это позволяет добиться стабильного срабатывания воздушных управляемых стержневых разрядников замыкателей в момент достижения током в активно-индуктивной нагрузке своего максимального значения. Поэтому разработка методики, позволяющей осуществлять рациональный выбор электрических параметров $L_n C_n$ -цепей поджига в генераторах ГБИТМ, является целью данной работы.

Рисунок 1 – Схема замещения ГБИТМ с применением управляемых воздушных стержневых разрядников P_2 и P_3 в кроубар-замыкателях RL - нагрузки

$$u_{n2}(t) = u_{n3}(t) = L_{n1} \frac{di_{n1}}{dt} = L_{n2} \frac{di_{n2}}{dt}, \quad (1)$$

где $i_{n1}(t) = i_{n2}(t)$ – импульсные токи в $L_n C_n$ – цепях поджига генератора ГБИТМ.

Пренебрегая влиянием активных сопротивлений электрических цепей поджига в ГБИТМ, запишем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} i_{31} - i_{n1} - i_{k1} = 0; & i_{31} - i_{32} = 0; & i_{k1} - i_{k2} = 0; \\ \frac{m}{C_{1k}} \int_0^t i_{k1} dt - \frac{1}{C_{n1}} \int_0^t i_{n1} dt - L_{n1} \frac{di_{n1}}{dt} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $i_{k1} = i_{k2}$ – импульсные токи в той части корректирующих емкостей, к которым производится подключение цепи поджига; m – число конденсаторов в корректирующих емкостях $C_{k1} = C_{k2}$, к которым подключены $L_n C_n$ – цепи.

Представив (2) в операторном виде по Карсону, получим операторное выражение для изображений токов в цепи замыкателей нагрузки:

$$i_{31}(p) = i_{32}(p) = i_{n1}(p) \frac{C_{k1} L_{n1}}{m} [p^2 + \omega_n^2 + \omega_\kappa^2] = i_{n1}(p) \frac{C_{k1} L_{n1}}{m} (p^2 + r^2), \quad (3)$$

где $\omega_n = (C_{n1} L_{n1})^{-0,5} = (C_{n2} L_{n2})^{-0,5}$ – собственная круговая частота цепей поджига; $\omega_\kappa = m^{0,5} (C_{n1} L_{n1})^{-0,5} = m^{0,5} (C_{n2} L_{n2})^{-0,5}$ – круговая частота электрических цепей, образованных индуктивностями $L_{n1} = L_{n2}$ и частью конденсаторов корректирующей емкости $C_{k1} = C_{k2}$ в данном генераторе токов молнии; $r = (\omega_n^2 + \omega_\kappa^2)^{0,5}$.

Применив полученные выражения, представим изображение напряжений поджига $u_{n2}(t) = u_{n3}(t)$ в следующем виде:

$$u_{n2}(p) = u_{n3}(p) = \frac{c_0 U_0 p^4}{(p^2 + a_1^2)(p^2 + b_1^2)(p^2 + r^2)}, \quad (4)$$

где $c_0 = m L_n C_{1k}^{-1} (2L_n + L_{31} + L_{k1})^{-1} [L_n + L_n (L_{31} + L_{k1}) (2L_n + L_{31} + L_{k1})^{-1}]^{-1}$; a_1, b_1 – собственные круговые частоты колебаний импульсного тока в ГБИТМ [3,4].

Импульсное напряжение поджига $u_{n2}(t) = u_{n3}(t)$, соответствующее его операторному изображению (4), находим из известных таблиц оригиналов [5]:

$$u_{n2}(t) = u_{n3}(t) = \frac{U_0 c_0}{(b_1^2 - a_1^2)} \left[\frac{r^2 \cos(rt) - a_1^2 \cos(a_1 t)}{r^2 - a_1^2} - \frac{b_1^2 \cos(b_1 t) - r^2 \cos(rt)}{b_1^2 - r^2} \right]. \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что если электрические параметры сильноточного разрядного контура ГБИТМ удовлетворяют условию $3a_1 \approx b_1$, то в момент времени достижения импульсным током в нагрузке $i_n(t)$ своего максимального значения, равно $t_m \approx \pi(2a_1)^{-1} \approx 3\pi(2b_1)^{-1}$, амплитуду напряжения поджига можно определить из следующего приближенного соотношения:

$$u_{n2}(t_m) = u_{n3}(t_m) = U_{n2} = U_{n3} \approx \frac{U_0 c_0 r^2 \cos(rt_m)}{(b_1^2 - r^2) \cdot (r^2 - a_1^2)}. \quad (6)$$

Согласно (6) импульсное напряжение $u_{n2}(t) = u_{n3}(t)$ достигает своего первого отрицательного максимального значения, вызывающего пробой промежутков поджига, при выполнении условия вида $\cos(rt_m) = -1$, где $r = 2a_1$. При

этом амплитуду напряжения поджига можно определить из выражения:

$$U_{n2} = U_{n3} \approx -\frac{U_0 c_0 r^2}{(b_1^2 - r^2) \cdot (r^2 - a_1^2)} = -\frac{4U_0 c_0}{15a_1^2}. \quad (7)$$

Воспользовавшись соотношением $\cos(rt_m) = -1$, запишем приближенное выражение, позволяющее производить выбор электрических параметров $L_n C_n$ -цепей поджига в мощных генераторах ГБИТМ согласно рис. 1:

$$(C_{n1} L_{n1})^{-1} + m \cdot (C_{1k} L_{n1})^{-1} \approx 4a_1^2. \quad (8)$$

Проведем оценочный расчет электрических параметров $L_n C_n$ - цепей поджига в генераторе ГБИТМ, в разрядной цепи которого используется генератор импульсных напряжений на 3 МВ (ГИН-3), собственные электрические параметры которого были равны: $C_r \approx 0,08$ мкФ, $L_r \approx 35$ мкГн, $R_r \approx 2$ Ом. Отметим, что цепи кроубар-замыкателей и RL - нагрузки в данном генераторе тока молнии имеют следующие электрические параметры: $R_{31} \approx R_{32} \approx 0,1$ Ом; $L_{31} \approx L_{32} \approx 5$ мкГн; $L_{k1} \approx L_{k2} \approx 5$ мкГн; $C_{k1} \approx C_{k2} \approx 20,83$ нФ; $R_n \approx 0,1$ Ом; $L_n \approx 14$ мкГн; $a_1 = 0,4927 \cdot 10^6$ с⁻¹; $b_1 = 1,2962 \cdot 10^6$ с⁻¹. Указанные корректирующие емкости выполнены в виде последовательного соединения 12 конденсаторов типа ИК-100-0,25. Приняв $m = 2$, положим, что конденсаторы $C_{n1} = C_{n2}$ имеют электрическую емкость, равную $C_{n1} = C_{n2} = 50$ нФ (два последовательно соединенных высоковольтных конденсатора типа ИМН-100-0,1). Применяв выражение (8), находим, что значение индуктивностей $L_{n1} = L_{n2}$ в нашем случае будет приблизительно равно $L_{n1} = L_{n2} \approx 28,56$ мкГн. Выбрав $L_{n1} = L_{n2} = 30$ мкГн и $C_{n1} = C_{n2} = 50$ нФ, оценим амплитуду импульсного напряжения поджига $u_{n2}(t) = u_{n3}(t)$ для управляемых воздушных стержневых разрядников Р₂ и Р₃ кроубар-замыкателей нагрузки при рабочем напряжении генератора ГИН-3, равном $U_0 = 0,7$ МВ. Тогда с учетом выражения (7) находим, что амплитуда напряжения поджига в исследуемом генераторе ГБИТМ будет приблизительно равна $U_{n2} = U_{n3} \approx -60,53$ кВ. Выбор длины промежутков в управляемых воздушных стержневых разрядниках замыкателей нагрузки ГБИТМ проводим по инженерной методике, приведенной в [4]. Расчеты на ПЭВМ и проведенные эксперименты показывают, что в данном генераторе импульсных токов молнии при выбранных электрических параметрах цепей поджига импульсное напряжение $u_{n2}(t) = u_{n3}(t)$ достигает своего отрицательного максимального значения при $t_n \approx 3,85$ мкс и имеет амплитуду, равную $U_{n2} = U_{n3} \approx -64$ кВ. Приведенная выше инженерная методика была применена и для приближенного расчета электрических параметров ГБИТМ, который в своем составе содержал модернизированный генератор импульсных напряжений на 3 МВ (ГИН-3). При проведении модернизации генератора ГИН-3 нами была увеличена его электрическая емкость C_r в «ударе», которая после проведения соответствующих монтажно-демонтажных работ в разрядной цепи этого генератора стала иметь значение, равное $C_r \approx 0,13$ мкФ. Увеличение емкости C_r генератора ГИН-3 было достигнуто путем параллельного подключения к его базовым конденсаторам типа КБКГИ-125/1,28 импульсных конденсаторов типа ИК-

100-0,4. На рис. 2 приведена осциллограмма импульсного тока $i_n(t)$ имитированной молнии, измеренного в RL -нагрузке ($R_n \approx 0,1$ Ом; $L_n \approx 14$ мкГн) при применении в ГБИТМ модернизированного генератора ГИН-3 и корректирующих емкостей $C_{k1} \approx C_{k2} \approx 20,83$ нФ. В данном генераторе больших импульсных токов были применены $L_n C_n$ -цепи поджига, которые имели следующие электрические параметры: $C_{n1} = C_{n2} = 50$ нФ, $L_{n1} = L_{n2} = 30$ мкГн, $C_{p1} = C_{p2} = 50$ нФ. Согласно данным рис. 2 разрядный импульсный ток $i_n(t)$ искусственной молнии в принятой электрической нагрузке имел следующие амплитудно-временные параметры: амплитуду $I_{nm} \approx 103,4$ кА; длительность фронта $\tau_f \approx 2,2$ мкс; длительность импульса $\tau_{n0,5} \approx 60$ мкс. Этот импульсный ток $i_n(t)$ в нагрузке был получен при рабочем напряжении генератора ГИН-3, равном $U_0 \approx 1,75$ МВ. Данное рабочее напряжение в ГБИТМ соответствует зарядному напряжению каскада (ступени) его генератора ГИН-3, равному $U_s \approx \pm 58$ кВ. При проведении указанных экспериментов длины основных и поджигающих разрядных промежутков в управляемых воздушных стержневых разрядниках кроубар-замыкателей RL -нагрузки были установлены соответственно равными $S_2 = S_3 = 0,645$ м и $S_{2n} = S_{3n} = 0,132$ м, что хорошо согласуется с результатами приближенных расчетов, представленных в [4].

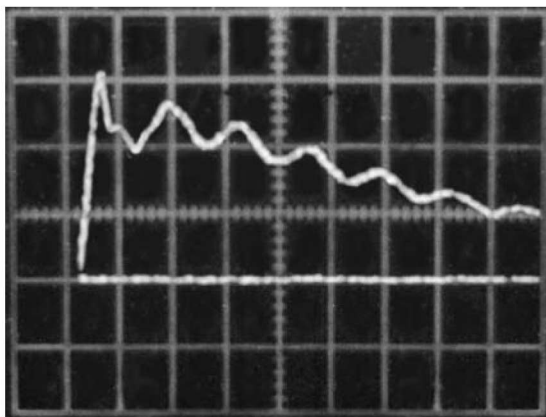


Рисунок 2. Экспериментальная кривая тока $i_n(t)$ искусственной молнии в RL -нагрузке ГБИТМ с модернизированным генератором импульсных напряжений ГИН-3 (масштаб по амплитуде – 35,1 кА/клетка; масштаб по времени – 10 мкс/клетка)

Выводы. Разработана инженерная методика для рационального выбора электрических параметров $L_n C_n$ -цепей поджига воздушных кроубар-замыкателей нагрузки в мощных генераторах ГБИТМ, формирующих большие импульсные токи искусственной молнии. Экспериментально показано, что описанный генератор импульсного тока искусственной молнии с управляемыми воздушными стержневыми разрядниками кроубар-замыкателей нагрузки может стабильно работать в мегавольтном диапазоне выходных напряжений.

Список литературы: 1. Патент України № 6279, МКІ НОЗКЗ/53. Генератор імпульсних струмів // Баранов М.І., Ігнатенко М.М., Колобовський А.К. – Опубл. Бюл. № 5, 16.05.2005. – 4 с. 2. Патент України № 15714, МКІ НОЗКЗ/53. Генератор великих імпульсних струмів блискавки // Баранов М.І., Ігнатенко М.М. – Опубл. Бюл. №7, 17.07.2006. – 4 с. 3. Ігнатенко Н.Н. Расчет переходных процессов в генераторах тока молнии с замыкателями нагрузки // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – № 11. – С. 38-45. 4. Ігнатенко Н.Н. Выбор длины воздушных промежутков разрядников замыкателей нагрузки в крзбар-генераторах импульсного тока молнии // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – № 39. – С. 64-69. 5. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. – М.: Высшая школа, 1965. – 466 с.

Поступила в редколлегию 28.03.2011.

УДК 537.523/.527 : 621.387

Н. И. БОЙКО, д-р техн. наук, главн. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

ПРОМЫШЛЕННОЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА – ОСНОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Розглянуто технології очищення газових викидів, очищення води і інші технології на основі імпульсного коронного розряду. Показано переваги цих технологій порівняно з відомими завдяки використанню сильних імпульсних електричних полів і високо інтенсивних мікрочастинок, насамперед електронів з енергіями приблизно 10 еВ і більше.

Technologies of gas exhaust and water cleaning and clearing and other technologies on the base of pulsed corona discharge are considered. Advantages of these technologies are showed in comparison with known ones because of use of high pulsed electric fields and high intensive micro particles in the first place electrons with energies approximately 10 eV and more.

Технологии на основе импульсного коронного разряда

Коронный разряд – вид самостоятельного высоковольтного газового разряда, возникающего в резконеоднородном электрическом поле при превышении напряженностью поля и напряжением на разрядном промежутке начальных значений. Именно коронный разряд используется сегодня в большинстве промышленных высоковольтных электротехнологий. Такими технологиями являются: очистка газовых выбросов от конденсированных частиц в электрофильтрах, озонные технологии на основе коронного разряда в озонаторах, модификация поверхностей различных материалов, в том числе с целью создания многослойных материалов с различными характеристиками слоев, электросепарация с использованием коронного разряда и др.

Цель данной работы – показать эффективные экологические применения импульсного коронного разряда в области ресурсо- и энергосбережения, про-